

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
30. August 2001 (30.08.2001)

PCT

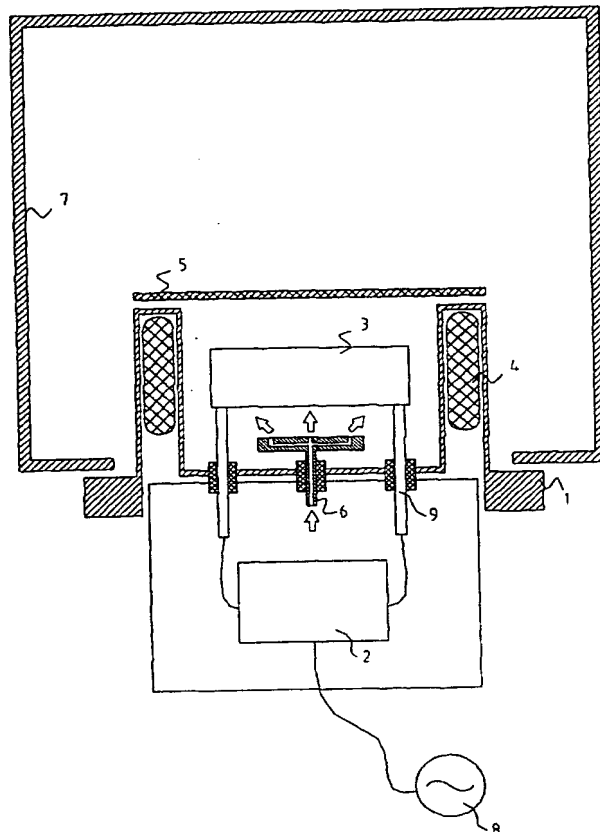
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 01/63981 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **H05H 1/46,** 100 08 486.9 24. Februar 2000 (24.02.2000) DE  
H01J 37/32
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP01/01952
- (22) Internationales Anmeldedatum: 21. Februar 2001 (21.02.2001)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
100 08 482.6 24. Februar 2000 (24.02.2000) DE  
100 08 483.4 24. Februar 2000 (24.02.2000) DE  
100 08 484.2 24. Februar 2000 (24.02.2000) DE  
100 08 485.0 24. Februar 2000 (24.02.2000) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CCR GMBH BESCHICHTUNGSTECHNOLOGIE** [DE/DE]; Maarweg 30, 53619 Rheinbreitbach (DE).
- (72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **WEILER, Manfred** [DE/DE]; Mühlenweg 52a, 53619 Rheinbreitbach (DE).  
**DAHL, Roland** [DE/DE]; Bergstrasse 8, 53545 Ockenfels (DE).
- (74) Anwalt: **EGGERT, Hans-Gunther**; Räderscheidtstrasse 1, 50935 Köln (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CR, CU,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: HIGH FREQUENCY PLASMA SOURCE

(54) Bezeichnung: HOCHFREQUENZ-PLASMAQUELLE



(57) Abstract: The invention relates to a high frequency plasma source, comprising a support element, on which a magnetic field coil arrangement (4), a gas distribution system (6) and a unit for extraction of a plasma beam are arranged. Additionally a high frequency matching network (2) is arranged within the plasma source.

(57) Zusammenfassung: Hochfrequenz-Plasmaquelle mit einem Trägerelement (1), auf dem eine Magnetfeldspulenordnung (4), ein Gasverteilungssystem (6) und eine Einheit zur Extraktion eines Plasmastrahls (5) angeordnet sind, wobei sich im Innern der Plasmaquelle zusätzlich ein Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk (2) befindet.

WO 01/63981 A1





CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

- (84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes, und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

## Hochfrequenz-Plasmaquelle

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur effizienten Anregung einer Niederdruck-Gasentladung (Plasma). Die Vorrichtung stellt einen hoch ionisierten und ladungs-  
5 kompensierten Plasmastrahl bereit, welcher aus einem hochdichten Niederdruck-Plasma extrahiert wird. Die Eigenschaften des Plasmastrahls (z.B. Ionenenergie, Ionenstromdichte, Zusammensetzung des Ionenstrahls) können sehr gut kontrolliert und eingestellt werden. Alternativ kann in Verbindung mit einem System zur selektiven Extraktion von Elektronen bzw. Ionen ein negativer bzw. positiver  
10 Teilchenstrom extrahiert werden.

Plasmasysteme sind für die Herstellung und Bearbeitung von Festkörpermaterialein in der Hochtechnologie von größter Bedeutung. Besonderes Interesse besteht für Plasmareaktoren, welche quasi-neutrale Plasmastrahlen erzeugen. Diese Plasma-  
15 reaktoren, im folgenden auch als Plasmaquellen bezeichnet, können in den verschiedensten Anwendungsgebieten der Plasmabearbeitung eingesetzt werden. Dazu zählt die Abscheidung und das Aufwachsen dünner Schichten, das Zerstäuben, das Ätzen, das Reinigen etc. Ein Plasmastrahl besteht zu gleichen Teilen aus positiv geladenen Ionen und (negativ geladenen) Elektronen und ist somit elektrisch neutral.  
20 Die Quasi-Neutralität des Plasmastrahls erlaubt die Beschichtung und Oberflächenbehandlung von elektrisch isolierenden Materialien, ohne daß ein zusätzlicher Aufbau zur Neutralisation des Plasmastrahls erforderlich ist.

Aktuelle Anwendungen erfordern oft einen hohen Anteil an Ionen mit präzise  
25 einstellbarer Ionenenergie, um die Ausbildung der gewünschten chemischen Bindung sicherzustellen. So ist zur Abscheidung von harten Schichten aus diamant-ähnlichem Kohlenstoff (diamond-like carbon, DLC) oder kubischem Bornitrid ein hochionisierter Plasmastrahl mit Ionenenergien von ungefähr 100 eV erforderlich, um den Anteil der  $sp^3$ -Bindungen zu maximieren. Ein energetischer Abscheideprozess ist zum Über-  
30 schreiten der Nukleationsschwelle ebenso erforderlich wie auch zum Sicherstellen einer geschlossenen, kontinuierlichen Schicht. Die Forderung nach einem möglichst hohen Ionenanteil bedeutet, daß die Plasmen bei niedrigen Drücken, typischerweise unter  $10^{-3}$  mbar, erzeugt werden. Dies wiederum erfordert die magnetfeld-unterstützte Anregung des Plasmas, um Verluste durch Rekombination an den Wänden des Plasmagefäßes zu vermeiden. Eine effiziente Anregung des Plasmas ist Grundvoraus-  
35 setzung für eine hohe Plasmadichte und hohe Abscheide- oder Ätzraten, um somit

kurze und kostengünstige Bearbeitungszeiten gewährleisten zu können. Von keiner geringeren Bedeutung ist die Fähigkeit einer Plasmaquelle möglichst große Substratflächen bearbeiten zu können, um ökonomisches Bearbeiten mit hoher Effizienz sicherzustellen.

5

Es gibt verschiedenartige Systeme zur plasma-gestützten Behandlung von Festkörperoberflächen. Ein Teil dieser Systeme beruht auf der Verwendung von hochfrequenten elektrischen Wechselfeldern zur Erzeugung des Plasmas. Die meisten dieser Systeme haben Kathoden- und Anoden-Platten, wobei die Hochfrequenz-Leistung kapazitiv über die Kathode in das Plasma eingespeist wird. Zwischen den Elektroden bildet sich eine Vorspannung aus, deren Größe von der Elektrodenfläche und der angelegten Hochfrequenz-Amplitude abhängig ist. Um den Ionenbeschuß zu maximieren, wird das Substrat auf der Kathode plaziert. Nachteil der kapazitiv gekoppelten Hochfrequenz-Systeme ist die sehr geringe Plasmadichte, welche sich aus der ineffizienten Einkopplung der Hochfrequenz-Leistung in das Plasma ergibt. Bei typischen Prozeßdrücken im Bereich von  $10^{-3}$  mbar enthält der auf das Substrat einfallende Teilchenstrom lediglich etwa 5 % energetischer Teilchen. Dies reicht für viele praktische Anwendungen, die einen energetischen Ionen-dominierten Prozeß erfordern, nicht aus. Ein weiterer Nachteil konventioneller Hochfrequenz-Plasmaquellen ist die breite Ionenenergie-Verteilung. Zusätzlich haben diese Systeme relativ geringe Aufwuchsraten, wobei die Leistungsdaten auch noch sehr von den Umgebungsbedingungen abhängen.

10

15

20

25

30

Das U.S.-Patent 5,017,835 beschreibt eine Hochfrequenz-Ionenquelle zur Erzeugung von großflächigen Ionenstrahlen, wobei induktiv Hochfrequenzenergie in das Plasma eingekoppelt wird. Diese Quelle nutzt die Elektronen-Zyklotronen-Wellenresonanz-Anregung eines Plasmas in einem rohrförmigen Plasmagefäß, welches zwischen einer Trägerplatte und einer Abschlußplatte eingeklemmt ist. Ein abstimmbarer Zwischenkreis verbindet den Hochfrequenz-Generator mit der Lastkreissspule. Ein schwaches Gleichstrom-Magnetfeld ist dem Plasma überlagert. Ein aus mehreren Elektroden bestehendes Ionenoptisches System zur Ionenextraktion ist in der Trägerplatte angeordnet.

35

Das U.S.-Patent 5,156,703 beschreibt ein Verfahren zur Abtragung und Strukturierung von Oberflächen, zur Herstellung von Oberflächendotierungen und zum Erzeugen von Oberflächenschichten durch Teilchenbeschuß aus einem Plasma. Es

wird ein quasi-neutraler Plasmastrahl aus einem durch elektrische und magnetische Felder erzeugten Niederdruckplasma dadurch extrahiert, daß eine Hochfrequenzspannung an eine Extraktionselektrode und eine weitere Elektrode, zwischen denen sich das Niederdruckplasma befindet, angelegt wird. Die Amplitude der zwischen dem Plasma und der Extraktionselektrode abfallenden Hochfrequenzspannung bestimmt die Energie der extrahierten Ionen.

M. Weiler et al. hat in den Applied Physics Letters Vol. 64 (1994), Seiten 2797-2799, und im Physical Review B, Vol. 53 (1996), Seiten 1594-1608, die Abscheidung von amorphem tetraedrisch gebundenem Kohlenwasserstoff mittels einer Plasmaquelle beschrieben, die eine hochfrequente (13.56 MHz), kapazitiv gekoppelte, magnetfeldunterstützte Plasmaentladung erzeugt. Diese Quelle besteht aus einer großen beweglichen hochfrequenz-gespeisten Elektrode sowie einer kleineren Netz-Elektrode, welche auf Erdpotential geschaltet ist. Dem Plasma wird ein statisches hyperbolisches Magnetfeld überlagert. Zwischen Elektrode, dem Plasma und dem geerdeten Netz bildet sich eine positive Vorspannung aus. Die Elektrode kann vertikal verschoben werden. Dabei ändert sich ihre effektive Fläche und ebenso die sich ausbildende Vorspannung. Somit kann über diese Veränderung die Energie der Ionen eingestellt werden, ohne den Gasdruck oder die eingespeiste Leistung zu verändern. Die Innovation besteht bei dieser Quelle darin, daß die Ionenenergie nicht durch Anlegen einer Spannung an das Substrat, sondern durch eine interne Vorspannung kontrollierbar bzw. einstellbar ist. Wie bei allen kapazitiv gekoppelten Plasmaquellen ist auch bei diesem System die Plasmadichte unterhalb einem Druck von  $10^{-3}$  mbar sehr gering.

Eine verbesserte Version der Plasmaquelle wurde durch M. Weiler et al. in den Applied Physics Letters Vol. 72 (1998), Seiten 1314-1316, beschrieben. Der Plasmastrahl wird durch eine hochfrequente (13.56 MHz), induktiv gekoppelte Plasmaentladung mit einem transversal überlagerten statischen Magnetfeld erzeugt. Die Ionenenergie kann durch Anlegen einer Hochfrequenzamplitude an eine sich hinter dem Plasma befindende Elektrode variiert werden.

Das U.S.-Patent 5,858,477 umfaßt Verfahren und Vorrichtungen zur Herstellung von Verschleißschutzschichten auf Speichermedien durch die Abscheidung von amorphem tetraedrisch gebundenen Kohlenwasserstoff. Eines der Systeme beschreibt eine Plasmaquelle, bei der eine Antenne ein Plasmavolumen umschließt und damit das Plasma durch Hochfrequenz induktiv anregt, eine Koppel­elektrode zum Plasma-

volumen hin und eine Extraktions-Elektrode über der Öffnung des Plasmavolumens angeordnet ist, die einen Ionenstrahl durch kapazitive Kopplung aus dem Plasma extrahiert. Spulen zur Erzeugung eines rotierenden transversalen Magnetfeldes sind zur Homogenisierung des Plasmastrahls um das Plasmavolumen herum angeordnet.

5

Ein Problem bei herkömmlichen Plasmaquellen ist, daß Ionenenergie und Ionenstromdichte nicht unabhängig voneinander einstellbar sind. Ein weiteres Problem bei konventionellen Hochfrequenz-Quellen besteht darin, daß ein separates Hochfrequenz-Impedanzanpaßnetzwerk erforderlich ist. Das Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk speist hierbei die Leistung des Hochfrequenz-Generators über ein Kabel in die Anregungselektrode ein, woraus sich erhebliche Leistungsverluste ergeben. Darüber hinaus können in üblichen Plasmaquellen die Amplitude der Hochfrequenz-Spannung sowie die Amplitude des Hochfrequenz-Stromes im Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk nicht unabhängig voneinander eingestellt werden. Damit können Resonanz-Effekte wie die Elektronen-Zyklotronen-Wellenresonanz oder die Landau-Dämpfung nicht in optimaler Weise genutzt werden.

10

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Vielseitigkeit, Funktionalität und Effizienz einer Plasmaquelle zu erhöhen, d.h. Ionenenergie und Ionenstromdichte unabhängig voneinander kontrollierbar zu machen, gleichzeitig hohe Plasmadichten sowie einen hohen Dissoziations- bzw. Ionisationsgrad bereitzustellen und Leistungsverluste zu verringern.

15

Erfindungsgemäß besteht die Hochfrequenz-Plasmaquelle, die zur Erzeugung eines quasineutralen Plasmastrahls oder eines Ionenstrahls verwendet werden kann, aus einem Trägerelement, auf dem eine Magnetfeldspulenordnung zur Erzeugung eines transversalen magnetischen Feldes, ein Gasverteilungssystem zum Einlassen des Arbeitsgases in das Plasmavolumen und eine Einheit zur Extraktion eines Plasmastrahls angeordnet sind, wobei sich im Innern der Plasmaquelle zusätzlich ein Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk zur Einspeisung der Generatorleistung ins Plasma befindet, das üblicherweise aus einem primären Schaltkreis mit einem beliebigen und einem variablen Kondensator und einer Hochfrequenz-Luftspule besteht sowie einem sekundären Schaltkreis mit einem Kondensator, einer Hochfrequenz-Luftspule und mindestens einer Anregungselektrode, wobei die beiden Schaltkreise über den induktiven Fluß der Hochfrequenz-Luftspulen und zusätzlich kapazitiv miteinander gekoppelt sind.

25

30

35

07

Bei der erfindungsgemäßen Plasmaquelle sind Ionenenergie, Ionenstromdichte, Dissoziations- und Ionisationsgrad unabhängig voneinander einstellbar. Die Quelle nutzt Hochfrequenz (typischerweise 13.56 oder 27.12 MHz) zur Anregung der Gasentladung. Die Hochfrequenz-Leistung wird dabei überwiegend induktiv in ein magnetfeld-unterstütztes Plasma über den Mechanismus der Elektronen-Zyklotronen-Wellenresonanz oder der Landau-Dämpfung in das Plasma eingespeist.

Das Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk, das u.a. zur Verringerung von Leistungsverlusten dient, ist integrativer Bestandteil der Plasmaquelle, d.h. es ist im Innern der Quelle angeordnet, so daß kein zusätzliches Anpaßnetzwerk mehr erforderlich ist. Es erlaubt, die Ionenenergie über einen weiten Bereich unabhängig von der Ionenstromdichte einzustellen. Bei Verwendung eines variablen Kondensators im Sekundärkreis kann dies kontinuierlich geschehen. Das Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk ist derart gestaltet, daß die unabhängige Kontrolle und Einstellbarkeit der Hochfrequenz-Strom-Amplitude und der Hochfrequenz-Spannungs-Amplitude gewährleistet ist. Dies ermöglicht die präzise Wahl der für den Anregungsmechanismus (ECWR oder Landau) notwendigen Bedingungen, damit das Plasma jeweils mit hoher Effizienz angeregt werden kann. Die erfindungsgemäße Plasmaquelle erzeugt sehr hohe Plasmadichten bis zu  $10^{13} \text{ cm}^3$ , stellt sehr hohe Ionisationsgrade bis zu 50 % bereit und weist sehr hohe Dissoziationsgrade auf, welche im Falle von zwei-atomigen Molekülen, wie z.B. Sauerstoff, Stickstoff oder Wasserstoff bis zu 80 % betragen können. Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Ionenenergie unabhängig von der Ionenstromdichte über einen Bereich von 10 bis etwa 1.000 eV kontinuierlich einzustellen. Somit erzeugt die erfindungsgemäße Plasmaquelle einen hoch-ionisierten ladungs-kompensierten Plasmastrahl mit wohl-definierter Charakteristik der Ionenenergie, Ionenstromdichte und Zusammensetzung des Plasmastrahls. Zusätzlich wird die Homogenität wie auch die Partikelfreiheit des Plasmastrahls sichergestellt. Dadurch sind die Langzeitstabilität der Plasmaquelle und damit die Beherrschbarkeit des Prozesses sowie auch sehr lange Standzeiten zwischen den Wartungsintervallen gewährleistet.

Ein derartiges Anpaßnetzwerk ist detailliert in der deutschen Patentanmeldung „Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk“ mit dem amtlichen Aktenzeichen 100 08 485.0 der Firma CCR GmbH Beschichtungstechnologie beschrieben.



Die Anregungselektrode, die zur kombinierten induktiven sowie kapazitiven Plasmaanregung dient, kann sowohl innerhalb des Vakuums als auch außerhalb angeordnet sein. Sie sollte in Form, Größe und Anordnung der Geometrie des gewünschten Plasmastrahls angepaßt sein. Es können auch mehrere Anregungselektroden verwendet werden, die dann vorzugsweise mit einem Abstand zwischen 10 und 100 mm nebeneinander im Vakuum angeordnet sind. Üblicherweise wird in diesem Fall jede Elektrode über ein eigenes Anpaßnetzwerk und einen separaten Hochfrequenz-Generator gespeist. So besteht die Möglichkeit, in den einzelnen Plasmavolumen unterschiedliche Plasmen zu erzeugen, sowie die Strahleigenschaften dieser Plasmen weitgehend unabhängig voneinander zu kontrollieren und einzustellen.

Es werden nur Anregungselektroden eingesetzt, deren Windungszahl  $n \leq 1$  ist. Hierdurch wird die Induktivität der Anregungselektrode und damit die Hochfrequenzamplitude, welche zwischen Anregungselektrode und Erde über das Plasma abfällt, minimiert. Dadurch erfolgt die Leistungseinkopplung in das Plasma überwiegend induktiv. Eine kontinuierlich zuschaltbare kapazitive Leistungseinkopplung erfolgt dann über die erfindungsgemäße Verschaltung des Anpaßnetzwerkes.

Üblicherweise werden Anregungselektroden aus Rohr- oder Drahtmaterial angefertigt. Soll die Ionenenergie nun mittels einer kapazitiven Ankopplung an das Plasma erhöht werden, d.h. durch eine zusätzliche Hochfrequenz-Amplitude, die zwischen Anregungselektrode und Erde über dem Plasma angelegt wird, so ist die maximal erreichbare Ionenenergie dennoch recht gering. Höhere Ionenenergien können durch Anregungselektroden aus Rohr- oder Drahtmaterial nicht erreicht werden. Die Randflächen des Plasmavolumens bestehen i.d.R. aus geerdeten wie auch aus hochfrequenzführenden Flächen. Je größer das Verhältnis aus hochfrequenzführender Fläche zu geerdeter Fläche ist, desto höher wird auch die maximal erreichbare Ionenenergie. Die Anregungselektrode wird somit mantel- oder bandförmig ausgeführt, um möglichst viel geerdete Fläche durch hochfrequenzführende zu ersetzen. Die Höhe des Mantels entspricht dabei maximal der Länge des Plasmavolumens. Die Elektrode kann die Form einer Platte oder eines nichtgeschlossenen Mantels haben, wobei dieser Mantel im Schnitt vorzugsweise ringförmig, sektorförmig, quadratisch oder rechteckförmig ist.

Die Leistungseinspeisung in das Plasma erfolgt durch Hochfrequenz. Damit sich die Effizienz der Leistungseinspeisung erhöht, wird üblicherweise dem Plasma und auch

der Anregungselektrode ein transversales Magnetfeld zur Resonanzanregung überlagert. Das Magnetfeld kann durch um das Plasmavolumen herum angeordnete Magnetfeldspulen erzeugt werden. Diese können sowohl außerhalb als auch innerhalb des Vakuums angeordnet und der Geometrie des Plasmavolumens angepaßt sein.  
5 Werden die Spulen mit Gleichstrom betrieben, ist das Magnetfeld statisch. Beim Betrieb mit Wechselstrom kann durch zeitlich versetzte Ansteuerung nebeneinander liegender Spulen bzw. durch phasenverschobene Ströme eine Rotation des Magnetfeldes um die Längsachse der Plasmaquelle erreicht werden. Das Magnetfeld ist dann dynamisch.

10

Über die Variation des Magnetfeldes kann wahlweise eine Resonanzanregung des Plasmas über die Erzeugung einer stehenden Welle oder durch die Erfüllung der Resonanzbedingungen für die Landau-Dämpfung durchgeführt werden. Über die Variation der magnetischen Feldstärke im Plasmaraum kann der Brechungsindex  $n$   
15 des Plasmas über weite Bereiche, in der Regel zwischen 50 und 500 variiert werden. Zur Erfüllung der Landau-Resonanzbedingung muß die Phasengeschwindigkeit  $C_{PL}$  der elektromagnetischen Welle mit der mittleren Geschwindigkeit  $V_e$  der Plasmaelektronen übereinstimmen. Die Phasengeschwindigkeit wird durch den Brechungsindex und die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen über die Elektronentemperatur  $T_e$  bestimmt. Es muß  $C_{PL} = C_v/n = (kT_e/m_e)^{1/2}$  gelten.  
20

Ein stationäres transversales Feld ist über das Plasmavolumen nicht homogen. Daraus ergibt sich eine örtlich unterschiedliche Anregungseffizienz im Plasmavolumen und es resultiert eine örtlich unterschiedliche Plasmadichte. Der extrahierte  
25 Plasmastrahl ist demzufolge auch inhomogen. Schlußendlich resultiert z.B. eine Beschichtung mit hohen Schichtdicken-Schwankungen. Die Inhomogenität des transversalen Magnetfeldes bildet sich somit auf dem Substrat ab. Die Homogenität der Anregung kann dadurch optimiert werden, daß ein dynamisches Magnetfeld verwandt wird. Anstatt zwei Magnetfeldspulen (stationär) werden dann mindestens  
30 drei Magnetfeldspulen um das Plasmavolumen herum angeordnet. Zum Antreiben der Spulen kann Wechselstrom ( $f < 100$  Hz) eingesetzt werden, und zwar derart, daß die Ströme in zwei nebeneinander (oder hintereinander) liegenden Spulen zueinander phasenverschoben sind. Dadurch wird eine Rotation des Magnetfeldes um die Längsachse der Plasmaquelle erreicht. Diese Rotation des Magnetfeldes führt  
35 integriert bzw. summiert über einen Rotations-Zyklus zu einer homogenen Anregung

- 8 -

des Plasmas. Zusätzlich findet eine homogenitätsverbessernde Durchmischung des Plasmas statt.

5 Eine zusätzliche Verbesserung der Homogenität des extrahierten Plasmastrahls wird erreicht, wenn über der innersten Spulen-Lage eine zweite Lage derart angeordnet wird, daß die Mitte einer Spule aus der 2. Lage über den Enden eines Spulenpaares aus der innersten Lage positioniert wird.

10 Idealerweise sind in der Hochfrequenz-Plasmaquelle Magnetfeldspulen, Anregungselektroden und Gaseinlaßsystem räumlich und geometrisch aufeinander abgestimmt.

15 Zur Extraktion von elektrisch geladenen Teilchen (in der Regel Ionen und/oder Elektronen) aus dem Plasma kann eine Einheit zur Extraktion eines Plasmastrahls, auch als Extraktionssystem bezeichnet, an der Öffnung des Plasmavolumens angeordnet sein. Im einfachsten Fall kann eine Blende, d.h. eine ebene Platte mit einer Öffnung, verwendet werden, so daß ein Ausströmen des Plasmas gewährleistet ist. Eine Variante besteht in der Verwendung eines Gitters, Netzes oder Drahtgewebes, welches sich auf Erdpotential befindet. Die Energie der aus der Quelle austretenden Ionen ergibt sich damit aus der Differenz von Plasma- und Erdpotential. Das Plasma-  
20 potential kann durch die Hochfrequenzamplitude des an der Anregungselektrode anliegenden elektrischen Wechselfeldes variiert werden. Es kann somit die kinetische Energie der Ionen durch die Hochfrequenz-Spannungsamplitude variiert werden.

25 Im folgenden wird die Erfindung beispielhaft anhand von Zeichnungen verdeutlicht:

Figur 1 zeigt den schematischen Aufbau der Plasmaquelle  
Figuren 2 a - j zeigen mögliche Formen und Anordnungen von Anregungselektroden  
Figuren 3 a - c zeigen einen Schnitt durch eine Anregungselektrode  
30 Figuren 4 a - n zeigen mögliche Formen und Anordnungen von Magnetfeldspulen  
Figur 5 zeigt die Ionenstromdichte als Funktion der magnetischen Feldstärke zur Darstellung der Landau-Dämpfungsresonanz  
Figuren 6 a, b zeigen verschiedene Anordnungen eines Plasmastrahl-Extraktions-  
systems

35

Der prinzipielle Aufbau der Plasmaquelle ist in Figur 1 dargestellt. Die Plasmaquelle setzt sich aus verschiedenen Hauptkomponenten zusammen. Sie besteht aus einem Trägerelement (1), auf dem eine Anordnung mehrerer Magnetfeld-Spulen (4) zur Erzeugung eines transversalen Magnetfeldes, eine Einheit zur Extraktion eines Plasmastrahls (5) und einem Gasverteilungssystem (6) angeordnet sind. Außerdem befindet sich im Innern der Plasmaquelle, ebenfalls mit dem Trägerelement (1) verbunden, ein Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk (2) zur Impedanzanpassung mit dazugehöriger Anregungselektrode (3) zur Erzeugung des Plasmas. Die Anregungselektrode (3) ist im Vakuum angeordnet und über Vakuumstromdurchführungen (9) mit dem Hauptteil des Anpaßnetzwerks verbunden. Das Arbeitsgas wird über das Gasverteilungssystem (6) durch die Plasmaquelle hindurch in das Plasmavolumen eingelassen. Die Plasmaquelle stellt in zusammengebaute Zustand und nach Abstimmung aller Komponenten eine kompakte Einheit dar, die an die Gehäusewand eines Vakuumgefäßes (7) angeflanscht werden kann. Zur Leistungseinspeisung ist ein Hochfrequenz-Generator (8) erforderlich, dessen Frequenz bei 13,56 MHz liegt. Die Ansteuerung der Magnetfeld-Spulen (4) erfolgt derart, daß ein rotierendes Magnetfeld erzeugt wird.

In Figur 2 sind verschiedene Formen und Anordnungen der Anregungselektroden dargestellt. Form und Größe der Anregungselektroden sind dem Querschnitt des gewünschten Plasmastrahls angepaßt. Die sektorförmige Anregungselektrode (Figur 2 a) erzeugt ein rundes Strahlprofil, die quadratische (Figur 2 b) ein quadratisches Strahlprofil. Die rechteckförmige (Figur 2 c) sowie die als Band (Figur 2 d) ausgeführte Anregungselektrode erzeugen ein linienförmiges Strahlprofil. Die beispielhaft beschriebenen Anregungselektroden können in vielfältiger Weise mit nur geringem Abstand von 10 bis 100 mm nebeneinander positioniert werden (Figuren 2 e - j).

Figur 3 a zeigt eine Schnittdarstellung einer 5 mm breiten und 50 mm hohen mantelförmigen Anregungselektrode. Figur 3 b zeigt eine Variante der Anregungselektrode, wobei eine Rohrleitung (10) mit ihr verbunden ist. Figur 3 c zeigt eine weitere Variante der Anregungselektrode, wobei diese selbst mit einem Hohlraum (12) versehen ist. Zur Kühlung kann das Innere der Rohrleitung (11) bzw. der Hohlraum (12) mit einem flüssigen Medium, vorzugsweise mit Wasser, durchspült werden.

Figur 4 zeigt mögliche Formen und Anordnungen von Magnetfeldspulen zur Erzeugung des transversalen Feldes.

Figur 5 zeigt das Resonanzverhalten der Quelle in der Darstellung der Ionenstromdichte als Funktion des Magnetfeldspulenstromes.

- 5 Figur 6 zeigt verschiedene Varianten eines Extraktionssystems. Im einfachsten Fall kann eine ebene Platte mit einer Öffnung (13) verwendet werden (Figur 6 a). Figur 6 b zeigt ein Drahtgewebe (14), welches sich auf Erdpotential befindet.

**Bezugszeichenliste:**

- |    |    |  |
|----|----|--|
|    | 1  | Trägerelement                              |
|    | 2  | Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk                 |
| 5  | 3  | Anregungselektrode                         |
|    | 4  | Magnetfeldspulenanordnung                  |
|    | 5  | Einheit zur Extraktion eines Plasmastrahls |
|    | 6  | Gasverteilungssystem                       |
|    | 7  | Gehäusewand eines Vakuumgefäßes            |
| 10 | 8  | Hochfrequenz-Generator                     |
|    | 9  | Vakuumstromdurchführung                    |
|    | 10 | Rohrleitung                                |
|    | 11 | Inneres der Rohrleitung                    |
|    | 12 | Hohlraum der Anregungselektrode            |
| 15 | 13 | Lochblende                                 |
|    | 14 | Gitter, Netz oder Drahtgewebe              |

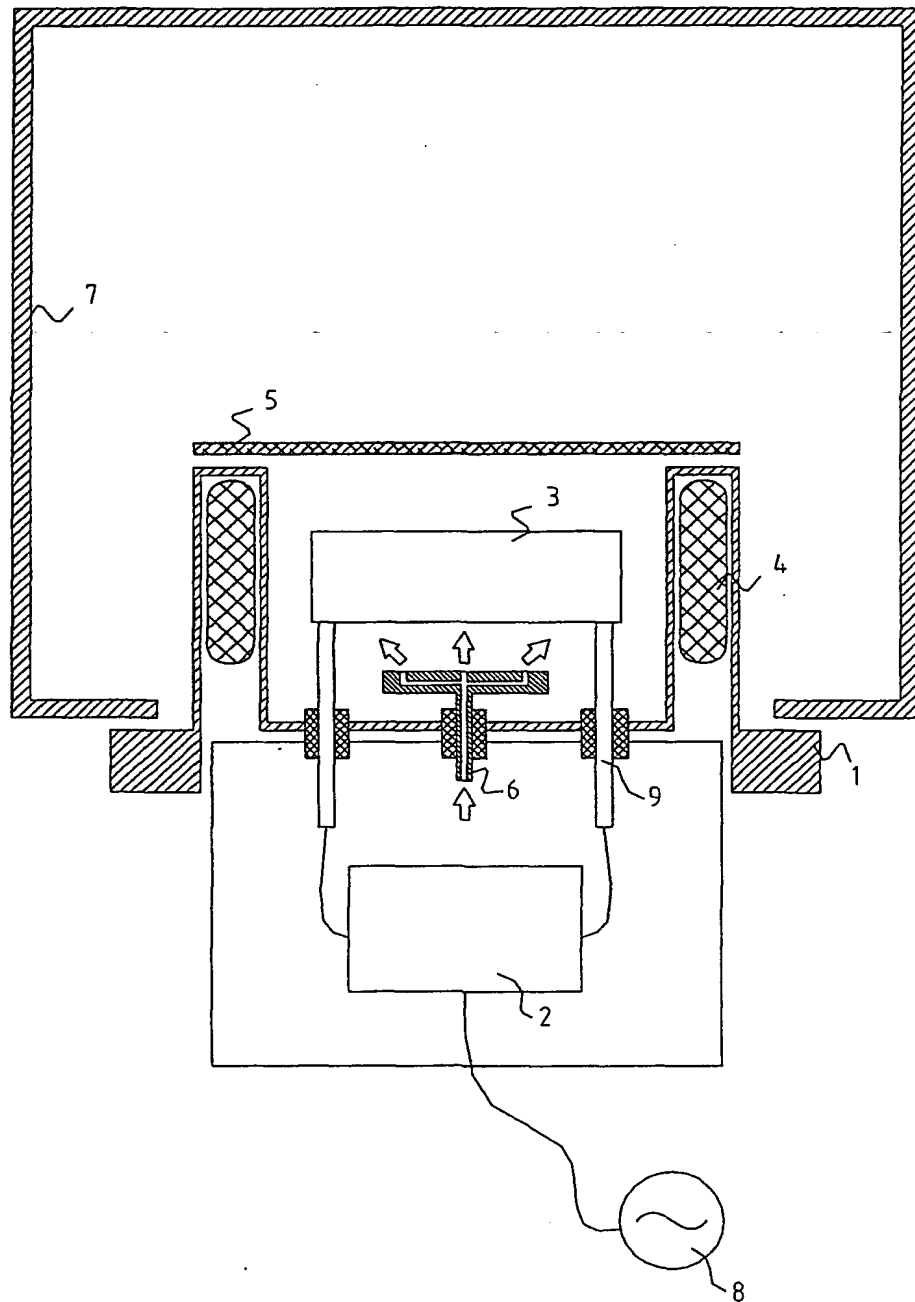
## P a t e n t a n s p r ü c h e

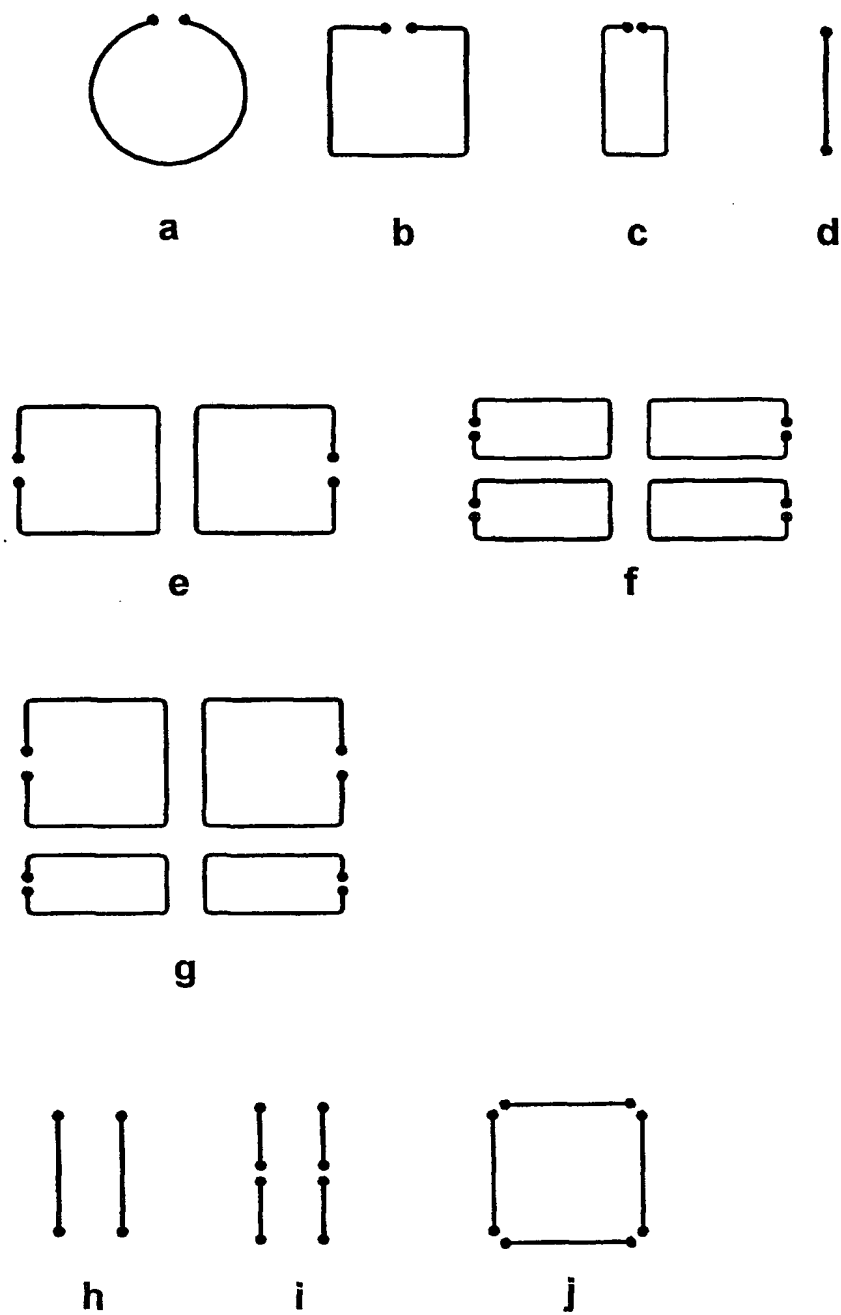
1. Hochfrequenz-Plasmaquelle mit einem Trägerelement (1), auf dem
  - eine Magnetfeldspulenanordnung (4),
  - ein Gasverteilungssystem (6) und
  - eine Einheit zur Extraktion eines Plasmastrahls (5)angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß sich im Innern der Plasmaquelle zusätzlich ein Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk (2) befindet.
2. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Hochfrequenz-Anpaßnetzwerk (2) aus einem primären Schaltkreis mit einem beliebigen und einem variablen Kondensator und einer Hochfrequenz-Luftspule sowie einem sekundären Schaltkreis mit einem Kondensator, einer Hochfrequenz-Luftspule und mindestens einer Anregungselektrode besteht, wobei die Schaltkreise über den induktiven Fluß der Hochfrequenz-Luftspulen und zusätzlich kapazitiv miteinander gekoppelt sind.
3. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen kapazitiver und induktiver Plasmaankopplung gewählt werden kann.
4. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß kontinuierlich zwischen kapazitiver und induktiver Plasmaankopplung gewählt werden kann.
5. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Anregungselektrode (3) im Vakuum angeordnet ist.
6. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß Form, Größe und Anordnung der Anregungselektrode (3) der Geometrie des gewünschten Plasmastahls angepaßt sind.
7. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Anregungselektrode (3) die Form einer Platte hat.

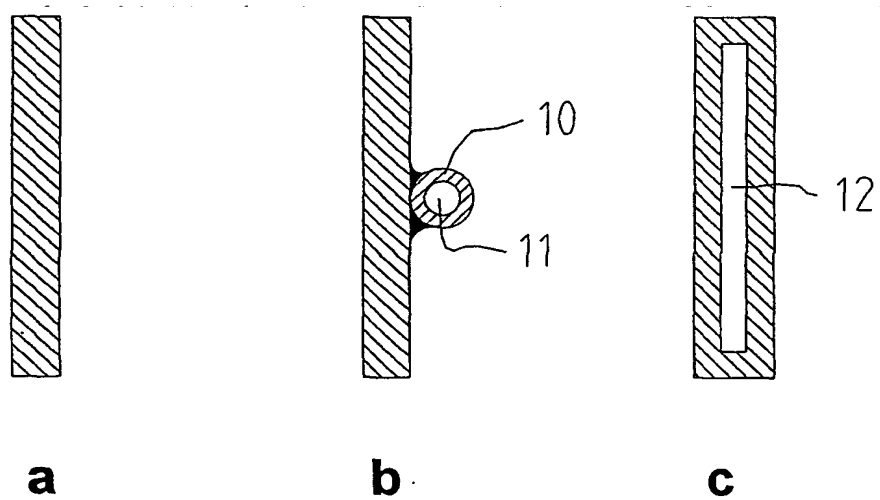
8. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Anregungselektrode (3) die Form eines nichtgeschlossenen Mantels hat.
9. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der nichtgeschlossene Mantel im Schnitt ringförmig ist.
10. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der nichtgeschlossene Mantel im Schnitt sektorförmig ist.
11. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der nichtgeschlossene Mantel im Schnitt quadratisch ist.
12. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der nichtgeschlossene Mantel im Schnitt rechteckförmig ist.
13. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Anregungselektroden (3) mit einem Abstand zwischen 10 und 100 mm nebeneinander im Vakuum angeordnet sind.
14. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Anregungselektrode (3) ein transversales Magnetfeld überlagert ist.
15. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung des transversalen Magnetfeldes Magnetfeldspulen (4) um das Plasmavolumen herum angeordnet sind.
16. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldspulen (4) außerhalb des Vakuums angeordnet sind.
17. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldspulen (4) innerhalb des Vakuums angeordnet sind.



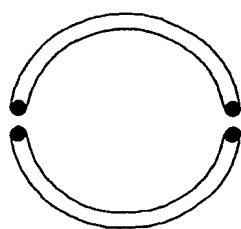
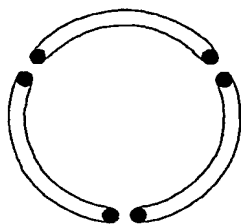
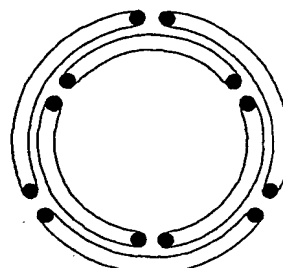
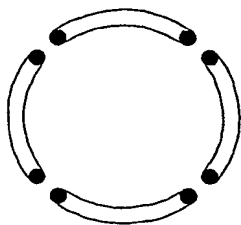
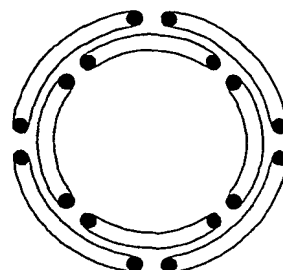
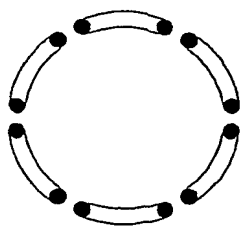
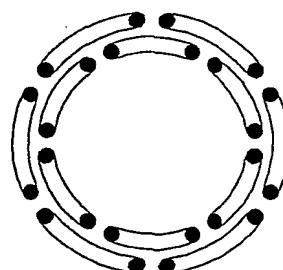
18. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldspulen (4) der Geometrie des Plasmavolumens angepaßt sind.
19. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 15 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldspulen (4) mit Gleichstrom betrieben werden und das Magnetfeld statisch ist.
20. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 15 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldspulen (4) mit Wechselstrom betrieben werden und das Magnetfeld dynamisch ist und/oder rotiert.
21. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß das dynamische Magnetfeld derart erzeugt wird, daß die Ströme durch benachbarte Magnetfeldspulen (4) phasenverschoben sind.
22. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldspulen (4), die Anregungselektrode (3) und das Gasverteilungssystem (6) räumlich und geometrisch aufeinander abgestimmt sind.
23. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß ein Extraktionssystem (5) vor der Öffnung des Plasmavolumens angeordnet ist.
24. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß das Extraktionssystem (5) aus einer Lochblende (13) besteht.
25. Hochfrequenz-Plasmaquelle nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß das Extraktionssystem aus einem Gitter, Netz oder Drahtgewebe (14) besteht.
26. Verwendung einer Hochfrequenz-Plasmaquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 25 zur Erzeugung eines quasineutralen Plasmastrahls.

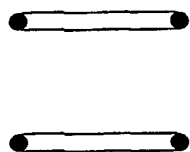
**Figur 1**

**Figur 2**

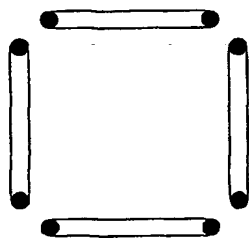


**Figur 3**

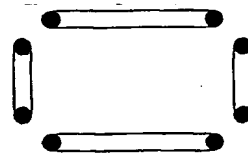
**a****b****c****d****e****f****g****Figur 4 (a-g)**



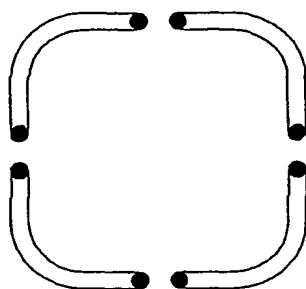
**h**



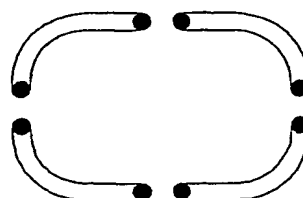
**i**



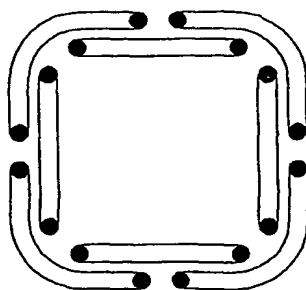
**j**



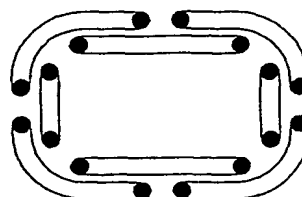
**k**



**l**

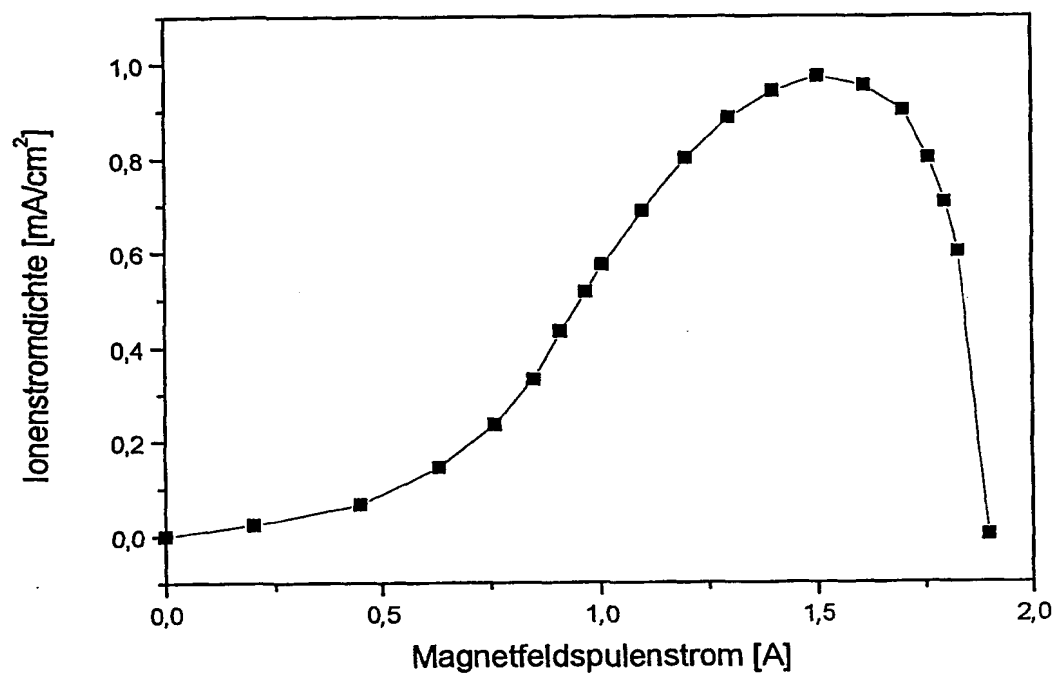


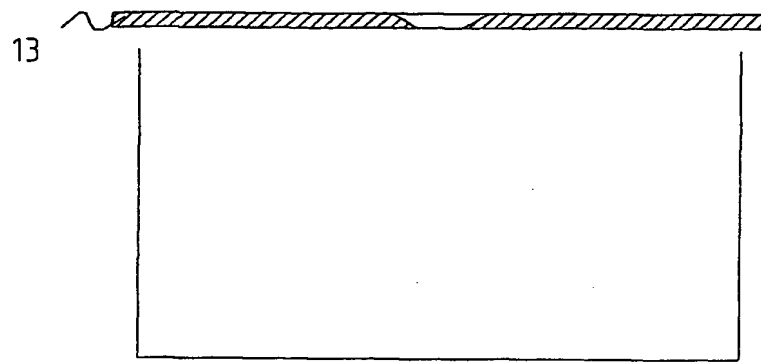
**m**



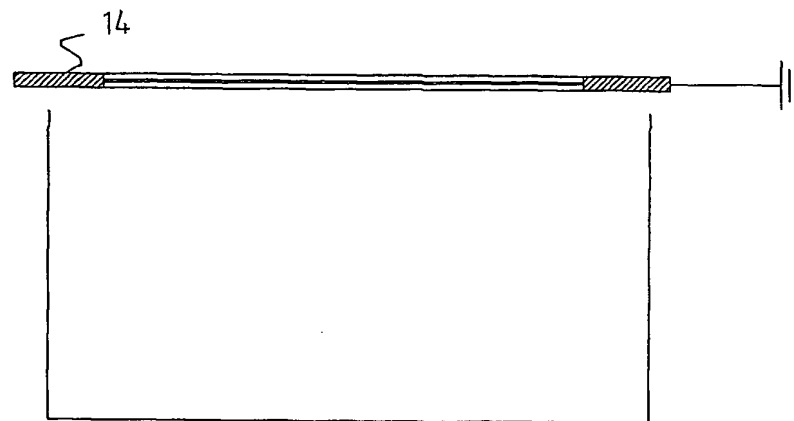
**n**

**Figur 4 (h-n)**

**Figur 5**



**a**



**b**

**Figur 6**



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

ational Application No

/EP 01/01952

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
IPC 7 H05H1/46 H01J37/32

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
IPC 7 H05H H01J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages  | Relevant to claim No.                                    |
|------------|---|--|
| Y          | US 5 858 477 A (WEILER MANFRED ET AL)<br>12 January 1999 (1999-01-12)<br>cited in the application<br><br>column 9, line 20 - line 34<br>column 10, line 27 - line 49<br>column 14, line 55 - column 15, line 17<br>figures 3A, 3D | 1, 5, 6, 8,<br>9, 11,<br>14-16,<br>18, 20,<br>21, 23, 25 |
| Y          | US 4 948 259 A (ENKE KNUT ET AL)<br>14 August 1990 (1990-08-14)<br><br>column 4, line 40 - line 51<br>figure 3<br><br>---<br>-/-  | 1, 5, 6, 8,<br>9, 11,<br>14-16,<br>18, 20,<br>21, 23, 25 |

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

\*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

\*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

\*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 June 2001

Date of mailing of the international search report

28/06/2001

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Capostagno, E

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

.../EP 01/01952

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No. |
|------------|--|-----------------------|
| A          | EP 0 597 497 A (APPLIED MATERIALS INC)<br>18 May 1994 (1994-05-18)<br>page 3, line 3 - line 13<br>claim 10<br>---  | 2                     |
| A          | WO 99 44219 A (MICRON TECHNOLOGY INC)<br>2 September 1999 (1999-09-02)<br>page 2, line 19 -page 3, line 8<br>---   | 3,4                   |
| A          | PATENT ABSTRACTS OF JAPAN<br>vol. 015, no. 277 (E-1089),<br>15 July 1991 (1991-07-15)<br>& JP 03 095843 A (NEC CORP),<br>22 April 1991 (1991-04-22)<br>abstract<br>--- | 17                    |
| A          | US 4 994 711 A (MATOSSIAN JESSE N)<br>19 February 1991 (1991-02-19)<br>claim 6<br>-----  | 24                    |